

ECP-model:

Simulatiemodel voor energieverbruik, CO₂-verbruik en kg-produktie
in de glastuinbouw

Eindverslag

G. Houter
Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk

PTG-verslag 4

december 1991

De ontwikkeling en validatie van het ECP-model is in opdracht van NOVEM B.V. te Sittard uitgevoerd door het Proefstation voor Tuinbouw onder Glas te Naaldwijk. Bij de ontwikkeling van het model is samengewerkt met het Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek te Wageningen. De validatie was in samenwerking met Brinkman B.V. te 's-Gravenzande, N.V. Nederlandse Gasunie te Groningen en elf tuinders in het Zuidhollands Glasdistrict.

Laboratorium voor
Tuinbouwplantenteelt
WAGENINGEN



INHOUDSOPGAVE

	pag.
SAMENVATTING	
DEFINITIES	
VOORWOORD	
1. INLEIDING	1
1.1. CO ₂ -dosering in glastuinbouw	1
1.2. Probleemstelling	2
1.3. Verslaglegging	2
2. OPBOUW VAN ECP-MODEL	4
3. VALIDATIE VAN ECP-MODEL	6
3.1. Algemeen	6
3.2. Selectie van bedrijven	7
3.3. Nabeschouwing van validatie	9
4. EINDDISCUSSIE	19
4.1. Gebruiksmogelijkheden van ECP-model	19
4.2. Verbetering en aanvulling van ECP-model	21
4.2.1. Algemeen	21
4.2.2. Verbetering	21
4.2.3. Verbreding	23
4.2.4. Verdieping	24
5. EINDCONCLUSIE	27
6. BRONVERMELDING	28

SAMENVATTING

In het kader van het NOVEM-project "Simulatie van het CO₂-verbruik in de glastuinbouw" is een simulatiemodel samengesteld. Dit model wordt met "ECP-model" aangeduid. Dit staat voor Energie, CO₂ en Produktie. Het ECP-model berekent het warmte- en CO₂-verbruik en de kg-produktie voor een op te geven gewas (komkommer, paprika, tomaat), kas, verwarmingsuitrusting (verwarmingsketel, warmtopslagtank, restwarmte, hetelucht), CO₂-uitrusting (rookgas CO₂, zuiver CO₂) en aan te houden kasklimaat (temperatuur- en CO₂-regime).

Hoofdelementen van het ECP-model zijn een kasklimaatmodel en een gewasmodel. Het kasklimaatmodel is gebaseerd op het onderzoek van Bot (1983) en De Jong (1985). Dit model berekent de condities in de kas bij gegeven buitenklimaat en klimaatregeling. Het gewasmodel is gebaseerd op het werk van Goudriaan (1986), Spitters et al. (1989) en het onderzoek van Gijzen (CABO, Wageningen). Dit model berekent aan de hand van de condities in de kas de gewasfotosynthese en de kg-produktie.

Het ECP-model is geschreven in Fortran, is modulair van opbouw en kan interactief gebruikt worden. De menu-structuren en de gebruikershandleiding zijn zodanig opgezet dat ook niet-ingewijden het model kunnen gebruiken. Aangenomen is dat de omvang van het gewas bepaald wordt volgens een op te geven verloop over het groeiseizoen van de leaf area index (LAI) en dat het gewas vanaf een op te geven dag oogstbare vruchten produceert.

Voor het reëel kunnen beoordelen van de kwaliteit van het ECP-model was het gewenst dat het model met betrouwbare gedetailleerde gegevens werd gevalideerd. Hiervoor zijn in het teeltseizoen 1989-1990 op acht bedrijven gegevens verzameld van dag- en nachtwaarden van het kasklimaat, en op weekbasis gegevens van aardgasverbruik, kg-produktie en eventueel verbruik van zuivere CO₂. Ook de klimaatinstellingen zijn geregistreerd. In hetzelfde teeltseizoen zijn op drie bedrijven 5-minutengegevens verzameld van kasklimaat, klimaatregeling, CO₂-dosering, branderregeling en aardgasverbruik. Op één van de drie bedrijven is ook het gebruik van de warmtebuffer gevolgd. Op twee van de drie bedrijven zijn de metingen tot 1 maart 1991 voortgezet.

De uitgebreide validatie geeft aan dat het ECP-model bij buitentemperaturen tussen -10 en 30 °C de werkelijkheid goed nabootst. De gemiddelde temperatuur van de kaslucht wordt binnen 1 °C nauwkeurigheid gesimuleerd. Voor de gemiddelde buistemperatuur is dit 5 °C en voor de gemiddelde CO₂-concentratie 50 ppm. De luchtvochtigheid van de kaslucht wordt in het algemeen overschat.

Uit de validatie blijkt verder dat de simulatie van het aardgasverbruik en de kg-produktie van komkommer, paprika en tomaat een foutmarge van 10 % heeft. Alleen de simulatie van het aardgasverbruik van een kas met scherm wordt duidelijk overschat. Daarom verdient het de aanbeveling het model-gedeelte van het scherm te verbeteren. Daarnaast heeft de vochthuishouding van de kas aandacht nodig.

Met het ECP-model is een hulpmiddel ontwikkeld waarmee betrouwbare kengetallen voor het beslissingsmodel voor het doorrekenen van de financiële consequenties van diverse investeringsbeslissingen rondom verwarming en CO₂ kunnen worden verkregen.

Tevens kan het ECP-model als onderzoekinstrument worden gebruikt voor het verkrijgen van inzicht in bijvoorbeeld warmtebuffering, CO₂-dosering, aardgasverbruik en fysisch processen.

De inzetbaarheid van het ECP-model kan zowel in de diepte als de breedte worden vergroot, als andere submodellen in het ECP-model worden opgenomen.

De verzamelde gegevens van de intensieve meetbedrijven vormen een unieke dataset, die voor velerlei toepassingen kan worden gebruikt. Uit de analyse van het gemeten gebruik van de warmtebuffer gecombineerd met theoretische benadering volgde een opslagrendement over een jaar van 92 %.

In het ECP-model is de stralingstransmissie door het kasdek gebaseerd op het model van Bot (1983). Voorafgaand aan het meetseizoen is op acht meetbedrijven de transmissie bij diffuse omstandigheden gemeten. Vervolgens is de transmissie ook gesimuleerd met het transmissiemodel, waarbij rekening is gehouden met de afmetingen van de constructiedelen. Uit de vergelijking van de gesimuleerde resultaten met de gemeten waarden volgde een maximale afwijking van 1 tot 1.5 %.

DEFINITIES

- azimut: afwijking van projectie van zonnestraal op aardoppervlak t.o.v. noord-zuidrichting (draaiing naar westen is positief).
- bedrijfsuitrusting: het geheel van voorzieningen op een bedrijf waaronder: verwarmingsinstallatie, CO₂-installatie (rookgas en/of zuiver), warmteopslagtank en scherm.
- common block: Fortran declaratie waarbij in- en output van module niet in de aanroep van module hoeft te worden opgenomen.
- CO₂-uitrusting: installatie waarmee CO₂ gedoseerd kan worden, zoals rookgas-CO₂ of zuiver CO₂.
- CO₂-verbruik: hoeveelheid CO₂ in kg.m⁻² per tijdseenheid die nodig is volgens het gekozen CO₂-regime.
- dampdrukdeficit: verschil tussen verzadigde en actuele dampdruk in N.m⁻².
- declinatie: hoek tussen zonnestraal loodrecht op aardoppervlak en vlak door evenaar.
- gasverbruik: hoeveelheid aardgas in m³.m⁻² per tijdseenheid.
- kasinhoud: kaslucht en gewas. Aangenomen wordt dat deze 2 objecten niet in temperatuur van elkaar verschillen.
- leaf area index (LAI): bladoppervlak per beteeld oppervlak (m².m⁻²).
- module: functie of subroutine.
- overzichtfile: file met uitgangssituatie voor simulatie met gegevens over gewas, kas, verwarmings- en CO₂-uitrusting, aan te houden kasklimaat en simulatieperiode. Deze file kan interactief gewijzigd worden.
- stookbehoefte: hoeveelheid warmte per tijdseenheid in W.m⁻² die nodig is om met de verwarmingsuitrusting het ingestelde temperatuurregime aan te aanhouden.
- ventilatietemperatuur: temperatuur van kasinhoud waarboven geventileerd wordt (raamstand > 0).
- ventilatie-traject: temperatuurtraject waarbinnen het openen van de luchtramen van 0 tot 100 % wordt gerealiseerd (100 % is aan beide zijden volledig geopend).
- verwarmingstemperatuur: temperatuur van kasinhoud waaronder het verwarmingssysteem voor extra warmteaanvoer zorgt.
- verwarmingsuitrusting: installatie waarmee in de warmtebehoefte kan worden voorzien zoals verwarmingsketel, restwarmte-installatie, heteluchtverwarming en warmteopslagtank.
- warmtebehoefte: hoeveelheid warmte per tijdseenheid in W.m⁻² die nodig is volgens het gekozen temperatuurregime om de temperatuur op het setpoint te houden.

VOORWOORD

Vanaf oktober 1987 is aan het project "Simulatie van het CO₂-verbruik in de glastuinbouw" gewerkt dat in opdracht van de NOVEM door het PTG werd uitgevoerd. Door een samenwerkingsovereenkomst tussen het PTG en het CABO te Wageningen werd in de eerste 10 maanden van het project op het CABO het ECP-model in grove vorm samengesteld. Hierbij is gebruik gemaakt van diverse deelmodellen die op het CABO en op diverse vakgroepen van de Landbouw-universiteit zijn ontwikkeld.

Vanaf augustus 1988 is door mij op het PTG het model verder verbeterd en aangepast aan praktijkomstandigheden. Voor de controle van de juistheid van het model zijn in het teeltseizoen 1989-1990 op 11 glastuinbouwbedrijven gegevens verzameld. Op 2 bedrijven is dit tot 1 maart 1991 voortgezet. Hierbij heb ik samengewerkt met de firma Brinkman te 's-Gravenzande en de Gasunie te Groningen. Brinkman heeft voor het project meet- en registratie-apparatuur beschikbaar gesteld. De Gasunie heeft op 3 meetbedrijven rendementsmetingen uitgevoerd en heeft meetapparatuur beschikbaar gesteld voor het aardgasverbruik en het volgen van de warmtebuffering. Deze samenwerking heeft geresulteerd in een zeer uitgebreide en betrouwbare dataset.

Voor de zeer vruchtbare samenwerking met de firma Brinkman en de Gasunie (met name dhr. Kiel) en voor de adviezen van dhr. Verveer wil ik hen hierbij hartelijk danken. Ook een woord van dank is verschuldigd aan de 11 tuinders die door het beschikbaar stellen van meetgegevens, vruchten voor drogestofbepalingen en algemene bedrijfsgegevens hun bijdrage aan het project hebben gegeven. Zonder hun medewerking had het validatieproject niet uitgevoerd kunnen worden.

De meetresultaten en de resultaten van de validatie zijn in een aantal verslagen beschreven. Door mijn voortijdig vertrek van het PTG was ik helaas niet in staat het project zelf volledig af te ronden. De resterende werkzaamheden zullen door Ton Rijdsdijk van de sectie kasklimaat worden uitgevoerd. Hij zal ook het ECP-model en de datafiles beheren.

Vanuit het PTG heeft Elly Nederhoff in het begin van het project de begeleiding verzorgd. Ook bij de opzet van de validatiemetingen heeft ze haar bijdrage geleverd. Bij de afronding van het project is de begeleiding door Sjaak Bakker overgenomen. Tijdens mijn verblijf op het CABO was de begeleiding in handen van Hans Gijzen en in een later stadium heeft hij me geregeld van nieuwe submodellen en informatie voorzien. Door de inzet van bovengenoemde personen is de uitvoering van het project soepel verlopen.

Daarnaast is de succesvolle uitvoering van het project mede mogelijk gemaakt door de medewerking van de technische dienst en de sectie informatica van het PTG. Voor het uitvoeren van de metingen op de bedrijven heeft Erik de Ruiter zijn bijdrage geleverd. Verder heeft Gonnie Bergman veel werk verzet bij het invoeren van de grote hoeveelheid meetdata en bij het verzorgen van de vele figuren in de verslagen. Daarnaast hebben de stagiaires Michel van Berkel, dhr. T. Buitelaar, Remko Noordermeer en Wim Poot mij veel werk uit handen genomen. Een ieder die een bijdrage aan het project heeft geleverd wil ik hierbij bedanken.

Tot slot wil ik de afdeling teelt- en kasklimaat van het PTG bedanken voor de gezellige en motiverende werksfeer.

Bert Houter
Naaldwijk, 27 september 1991

1. INLEIDING

1.1. CO₂-dosering in glastuinbouw

Planten leggen onder invloed van zonlicht bij de fotosynthese koolzuur (CO₂) en water vast in suikers. Deze suikers vormen de basisstof voor de groei van plant, mens en dier. De fotosynthese wordt niet alleen bevorderd door een hogere instraling, maar ook door een hogere CO₂-concentratie.

Voor een komkommernewas is berekend dat de gewasfotosynthese met 40 - 50 % toeneemt indien de CO₂-concentratie wordt verhoogd van 200 naar 340 ppm (d.i. de gemiddelde buiten-concentratie). De gewasfotosynthese kan nog met 45 - 75 % worden bevorderd als de CO₂-concentratie van 340 naar 1000 ppm wordt verhoogd (anonymus, 1988). Bij de teelten in kassen kan bij geringe ventilatie de CO₂-concentratie dalen tot 150 - 200 ppm. Dit gaat ten koste van de groei en de produktie van het gewas.

In de glastuinbouw in Nederland wordt daarom in het algemeen CO₂-dosering toegepast. Voor de CO₂-dosering wordt meestal CO₂ van rookgas gebruikt, dat bij de verbranding van aardgas vrijkomt. Indien er warmtevraag is, is de CO₂-produktie meestal voldoende groot om een CO₂-concentratie van 800 - 1000 ppm te bereiken. Het aanhouden van hogere CO₂-concentraties wordt afgeraden, omdat de gewasfotosynthese nauwelijks meer toeneemt, en de kans op schadelijke effecten wordt verhoogd door een te hoge CO₂-concentratie en verontreiniging van rookgas.

Er zijn ook gevallen waar onvoldoende CO₂ beschikbaar is, zelfs te weinig om een minimum CO₂-concentratie van 340 tot 400 ppm aan te houden. Hierbij zijn 3 situaties te onderscheiden:

- situatie 1: Bij gebruik van rest- of afvalwarmte van bijvoorbeeld industrie voor de verwarming van de kassen vindt er geen warmteproduktie op het bedrijf plaats. Daardoor is er geen CO₂ van de verwarmingsinstallatie beschikbaar voor dosering.
- situatie 2: Bij gebruik van een TE-installatie (warmtekracht) is de vrijkomende rookgas tot op heden niet geschikt voor CO₂-dosering, omdat hierin nog te veel schadelijke gassen (o.a. NO_x) voorkomen.
- situatie 3: Op een bedrijf met verwarmingsketel is er niet altijd een warmtevraag. Met name in het zomerhalfjaar is overdag de warmtevraag afwezig of te gering om voldoende CO₂ te produceren.

De produktie op de bedrijven van situatie 1 en 2 kan door het ontbreken van rookgas CO₂ veel lager zijn (ca. 20 %) dan op bedrijven met rookgasdosering. Daarom wordt op deze bedrijven soms zuivere CO₂ (vloeibaar) gedoseerd. Ook is het mogelijk dat door een speciale CO₂-brander CO₂ wordt aangemaakt waarbij de geproduceerde warmte aan de rest- of afvalwarmte of aan de warmte van de TE-installatie wordt toegevoegd.

Op bedrijven met verwarmingsketel (situatie 3) wordt soms aanvullend zuiver CO₂ gedoseerd. Gangbaarder is echter het gebruik van een warmteopslagtank. Met deze tank is het mogelijk de warmteproduktie en het warmteverbruik in tijd van elkaar te scheiden. Daardoor kan overdag bij CO₂-behoefte aardgas worden verbrand, waarbij de vrijkomende warmte in de tank opgeslagen kan worden. 's Nachts of 's morgens vroeg kan de opgeslagen warmte worden gebruikt voor de verwarming van de kas.

1.2. Probleemstelling

Bij investeringsvraagstukken rondom warmte- en CO₂-installaties is het van belang te weten hoe groot de aardgas- of warmtebehoefte, de CO₂-behoefte (bij zuiver CO₂) en de opbrengsten (kg-oogstbare produktie) zijn. De berekening van deze kengetallen is complex omdat:

- warmtebehoefte afhankelijk is van:
 - kaseigenschappen
 - klimaatregelinstellingen (gewenst klimaat in kas)
 - buitencondities
- CO₂-behoefte afhankelijk is van:
 - ventilatieverlies bepaald door vent.snelheid en CO₂-concentratie
 - gewasfotosynthese
 - warmteproduktie indien naast rookgas CO₂ aanvullend zuivere CO₂ wordt gedoseerd
- kg-opbrengst afhankelijk is van gewasfotosynthese die bepaald wordt door:
 - gewaseigenschappen
 - conditie en grootte van het gewas
 - condities in kas waaronder CO₂-concentratie, temperatuur en licht

Bij de berekeningen voor investeringen in warmteopslag tanks is tot nu toe gewerkt met verschillende onzekere aannames voor dagelijkse gemiddelden van CO₂-verliezen, warmtevraag en gerealiseerde CO₂-concentratie (Vermeulen, 1988). Voor nauwkeuriger berekeningen is het niet mogelijk om met dagelijkse gemiddelden te werken, maar moeten gedetailleerdere berekeningen worden uitgevoerd. Voor dit doel is een simulatiemodel bij uitstek geschikt. Daarom is een simulatiemodel samengesteld waarmee warmteverbruik, CO₂-verbruik en kg-produktie van verschillende warmte- en CO₂-installaties kunnen worden berekend. Met dit model kunnen verschillende aspecten van investeringsbeslissingen t.a.v. CO₂ worden onderbouwd. Het model wordt met "ECP-model" aangeduid. Dit staat voor Energie, CO₂ en Produktie.

Als vervolg op de ontwikkeling van het ECP-model is het model uitgebreid gevalideerd met gegevens die gedurende een teeltseizoen op elf praktijk-bedrijven zijn verzameld.

1.3. Verslaglegging

Dit verslag is het eindverslag van het NOVEM-project "CO₂-verbruik in de glastuinbouw", waarin het ECP-model is samengesteld en gevalideerd. In hoofdstuk 2 van dit verslag wordt de opbouw van het ECP-model besproken. In hoofdstuk 3 wordt de opzet en de nabeschuiving van de validatie gegeven. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 in de einddiscussie de gebruiksmogelijkheden van het ECP-model toegelicht. Hierbij wordt ook aangegeven op welke punten het model verder verbeterd of uitgebreid kan worden. Tot slot wordt in hoofdstuk 5 de eindconclusie van het project gegeven.

Naast dit eindverslag zijn enkele verslagen geschreven m.b.t. deelstukken, namelijk:

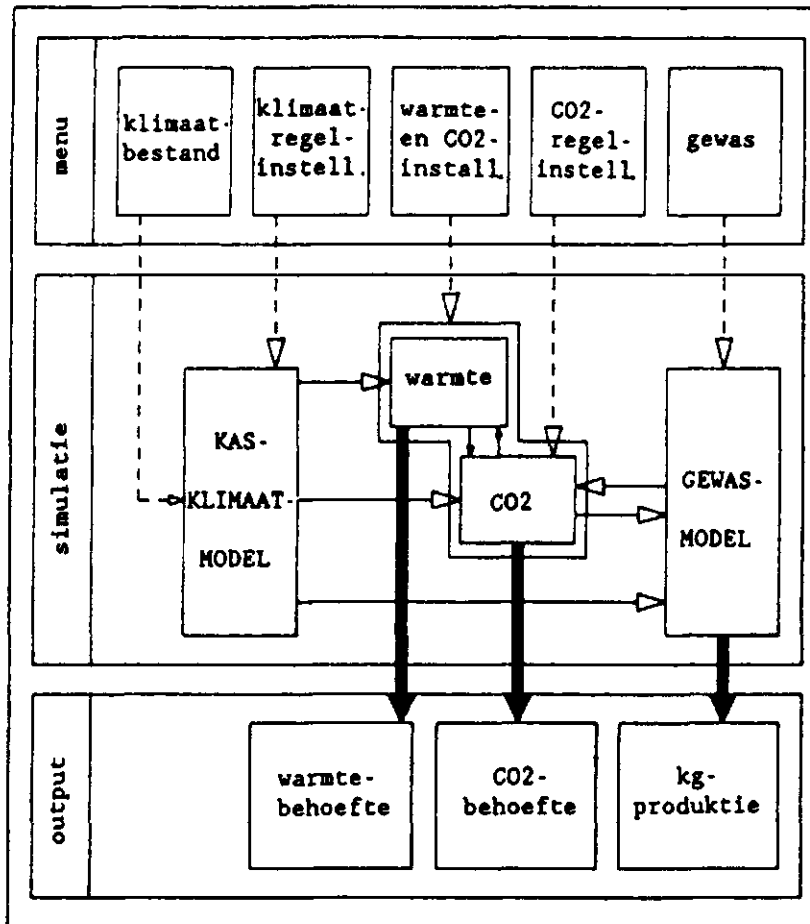
- 1a: Documentatie - modelbeschrijving
- 1b: Documentatie - invoergedeelte
- 1c: Documentatie - simulatiegedeelte
- 2: Gebruikershandleiding
- 3: Listing
- 4a: Validatie - beschrijving van bedrijven en metingen
- 4b: Validatie - analyse van meetresultaten
- 4c: Validatie - resultaten
- 5: Gevoeligheidsanalyse en case study

Niet elke gebruiker van het ECP-model hoeft al deze deelverslagen te bestuderen. Veelal kan met deelverslag 2 worden volstaan. De deelverslagen 1b, 1c en 3 zullen alleen door specialisten voor beheer en onderhoud van het model en datafiles worden geraadpleegd.

In het kader van het NOVEM-project zijn al eerder 6 verslagen met een beschrijving van het CO2-model (oude benaming van ECP-model) verschenen (Houter, 1989abcdef). Deze verslagen zijn opgenomen en zonodig bijgewerkt in bovengenoemde deelverslagen 1 t/m 3.

2. OPBOUW VAN ECP-MODEL

Het ontwikkelde ECP-model is schematisch op te splitsen in 3 gedeelten, namelijk in menu-, simulatie- en outputgedeelte. Figuur 1 geeft hiervan een overzicht.



Figuur 1. Structuur van ECP-model

In het menu-gedeelte van het model kan de gebruiker d.m.v. keuzemenu's de uitgangssituatie voor de simulatie opgeven.

Hierbij kan de gebruiker kiezen uit:

- klimaatbestanden met buitencondities;
- verwarmingsuitrustingen (verwarmingsketel, warmteopslagtank, restwarmte, hetelucht);
- CO2-uitrustingen (rookgas of zuiver CO2);
- gewassen (komkommer, paprika of tomaat).

Verder kan de klimaat- en CO2-regeling worden opgegeven. Voor een overzicht van alle keuzemogelijkheden wordt verwezen naar deelverslag 2 "Gebruikers-handleiding".

In het simulatiegedeelte zijn 2 submodellen te onderscheiden, namelijk een kasklimaatmodel en een gewasmodel. Het kasklimaatmodel is gebaseerd op het onderzoek van Bot (1983) en De Jong (1985) en het gewasmodel op het werk van Goudriaan (1986), Spitters et al. (1989) en het onderzoek van Gijzen (CABO, Wageningen).

Het kasklimaatmodel berekent aan de hand van uurlijkse data van de buitencondities en de opgegeven klimaatregelinstellingen het kasklimaat (temperatuur, luchtvochtigheid en straling). Verder berekent het kasklimaatmodel de warmtebehoefte voor het aanhouden van de gewenste kasluchttemperatuur en minimum buistemperatuur en de noodzakelijke ventilatiesnelheid.

Het gewasmodel simuleert de gewasfotosynthese en van daaruit de oogstbare kg-produktie. Dit tweede submodel heeft als input de condities in de kas (temperatuur, straling en CO₂-concentratie) en enkele gewasgegevens.

In figuur 1 zijn tussen het kasklimaatmodel en gewasmodel 2 blokjes weergegeven met "warmte" en "CO₂". In deze twee blokjes wordt resp. het warmte- en CO₂-verbruik berekend. Bij een verwarmingsketel wordt bij warmtevraag CO₂ geproduceerd (pijl van "warmte" naar "CO₂"). Bij CO₂-behoefte wordt warmte aangemaakt die eventueel in een warmteopslagtank opgeslagen wordt (pijl van "CO₂" naar "warmte"). Verder wordt de CO₂-concentratie beïnvloed door de gewasfotosynthese (pijl van "gewasmodel" naar "CO₂") en de ventilatiesnelheid (pijl van "kasklimaatmodel" naar "CO₂").

De resultaten van het ECP-model zijn warmte- en CO₂-behoefte en kg-produktie. Dit zijn de 3 belangrijkste kengetallen die nodig zijn voor de berekening van de financiële consequenties van een bepaalde investeringsbeslissing rondom CO₂.

In werkelijkheid zijn de 2 submodellen en de blokjes "CO₂" en "warmte" in het simulatiegedeelte geïntegreerd. Hierin is tevens de outputverzorging opgenomen. Het invoergedeelte met de keuzemenu's vormt een ander gedeelte. Het model is geschreven in Fortran en is modulair van opbouw.

3. VALIDATIE VAN ECP-MODEL

3.1. Algemeen

Een model krijgt pas waarde als aangetoond is dat het goed de werkelijkheid nabootst. Daartoe is een test (validatie) nodig.

Het submodel "kasklimaat" (fysische gedeelte van het ECP-model) is gebaseerd op het dynamische kasklimaatmodel van De Jong (1985). Het dynamisch kasmodel van De Jong is indertijd met meetgegevens van enkele dagen gevalideerd. Aangezien in het fysische gedeelte van het ECP-model het kasklimaat op elk moment (bij elke dataset) in evenwicht met zijn omgeving wordt verondersteld (steady state benadering, zie deelverslagen 1a en 1c), wijkt het reken-algoritme af van de dynamische benadering van De Jong (1985). Daarom was het gewenst dat het fysisch gedeelte van het ECP-model met praktijkgegevens van een teeltseizoen werden gevalideerd.

Het gewasmodel van het ECP-model is gebaseerd op gewasfotosynthese model dat voor verschillende kasgewassen door Gijzen (CABO - Wageningen) is gevalideerd. De resultaten van deze validaties zijn voor een deel beschreven door Nederhoff et al. (1988 en 1989). Omdat het gewasmodel ook de drogestof-verdeling in de tijd en tussen de vruchten en het overige deel van de plant simuleert, was het gewenst het gewasmodel van het ECP-model te valideren met praktijkgegevens.

Voor een validatie van het totale ECP-model waren geen datafiles beschikbaar met gedetailleerde gegevens over warmte- en CO₂-verbruik en kg-produktie. Daarom zijn in het teeltseizoen 1989-1990 op elf bedrijven gegevens verzameld over aardgasverbruik, CO₂-verbruik, kg-produktie en ingesteld en gerealiseerd kasklimaat. Deze elf bedrijven zijn onderverdeeld in acht extensieve en drie intensieve meetbedrijven. Op de extensieve bedrijven zijn dag- en nachtwaarden van het kasklimaat verzameld en de overige gegevens op weekbasis. De verzamelde gegevens worden normaal gebruikt voor de bedrijfs-registratie.

Op de drie intensieve bedrijven zijn de gegevens van ingesteld en gerealiseerd kasklimaat continu gemeten en zijn 5-minuten gemiddelden in bestanden op de bedrijfscomputer weggeschreven. Dit is ook gedaan voor CO₂-dosering, branderregeling, aardgasverbruik en op één bedrijf ook voor warmtebuffering. De kg-produktie is op weekbasis geregistreerd. Op twee intensieve meetbedrijven zijn de metingen tot 1 maart 1991 voortgezet, omdat de winter van 1990 erg zacht was geweest.

Met de gedetailleerde en nauwkeurige meetgegevens van met name het aardgas-verbruik kan het ECP-model op dagbasis en eventueel korter worden gevali-deerd. Daarnaast kan met de gegevens van CO₂-dosering, warmtebuffering en aardgasverbruik meer inzicht worden verkregen over het gebruik van de warmtebuffer. Verder biedt het de mogelijkheid om eventuele verschillen tussen simulatie en meting te verklaren. Voor een gedetailleerde beschrijving van de metingen wordt verwezen naar deelverslag 4a.

3.2. Selectie van bedrijven

Voor de validatie zijn gegevens van 11 bedrijven verzameld. Bij de selectie van de bedrijven is gelet op:

- kas en inrichting:
 - aaneengesloten venlo-kas (niet: bijvoorbeeld 2 vrij staande kassen)
 - constructie van kas (ventilatie, transmissie)
 - buisverwarming
 - eventueel scherm
 - ongeveer hetzelfde klimaatregime voor hele bedrijf
- Hierbij is getracht zo uniform mogelijke bedrijven te selecteren. Dit gold met name voor de 3 bedrijven waar intensief gegevens zijn verzameld.
- ligging:
 - afstand tot PTG i.v.m. meting van buitenconditie op PTG
 - intensieve bedrijven zo dicht mogelijk bij PTG i.v.m. veelvuldig bezoek tijdens installatie van aanvullende sensoren en testen (alleen in het begin) en ophalen van data (wekelijks)
- bedrijfsuitrusting:
 - al dan niet warmtebuffer (niet alle bedrijven dezelfde grootte per ha)
 - al dan niet zuivere CO₂-doseerinstallatie
- gewas en teelt:
 - jaarrond hetzelfde gewas op steenwol
 - gewassen: komkommer, paprika en tomaat
- klimaatcomputer:
 - uit praktische overweging (zelfde bediening, instellingen en output) in eerste instantie beperkt tot Brinkman-computers, omdat op intensieve bedrijven Brinkman een bijdrage wilde leveren aan de aanvullende metingen en registratie
- medewerking en ervaring van tuinder bij registratie

In de oorspronkelijke opzet was gekozen voor 9 bedrijven: 3 bedrijven met een intensieve dataverzameling en 6 bedrijven met een extensieve dataverzameling. Over deze 9 bedrijven zouden de 3 verschillende gewassen met elke 3 bedrijven worden verdeeld.

Bij de selectie van de bedrijven bleek dat het niet mogelijk was om een geschikt komkommerbedrijf te vinden met Brinkman-computer voor de intensieve dataverzameling. Daarom is bij de intensieve bedrijven gekozen voor 2 tomatenbedrijven en 1 paprikabedrijf.

Verder was het niet mogelijk om geschikte bedrijven te vinden met Brinkman-computer en zuivere CO₂-dosering. Daarom zijn hiervoor 2 bedrijven gekozen met een Priva-computer. Daarmee is het totaal aantal bedrijven op 11 gekomen. Tabel 1 geeft een totaal overzicht van de geselecteerde bedrijven.

Tabel 1. Overzicht van geselecteerde bedrijven met gewas en bedrijfs-
uitrusting.

bedrijf	gewas	warmtebuffer (m ³ .ha ⁻¹)	zuivere CO ₂	computer
intensief:				
1	ronde tomaat	72	-	Brinkman
2	paprika (vnl. groen)	-	-	Brinkman
3	ronde tomaat met tussenplanting vleestomaat	-	-	Brinkman
extensief:				
4	komkommer	-	-	Brinkman
5	ronde tomaat	80	-	Brinkman
6	paprika (rood)	77	-	Brinkman
7	paprika (rood)	60	-	Brinkman
8	komkommer	-	ja	Priva
9	komkommer	58	-	Brinkman
10	ronde tomaat	37	ja	Priva
11	komkommer	-	-	Brinkman

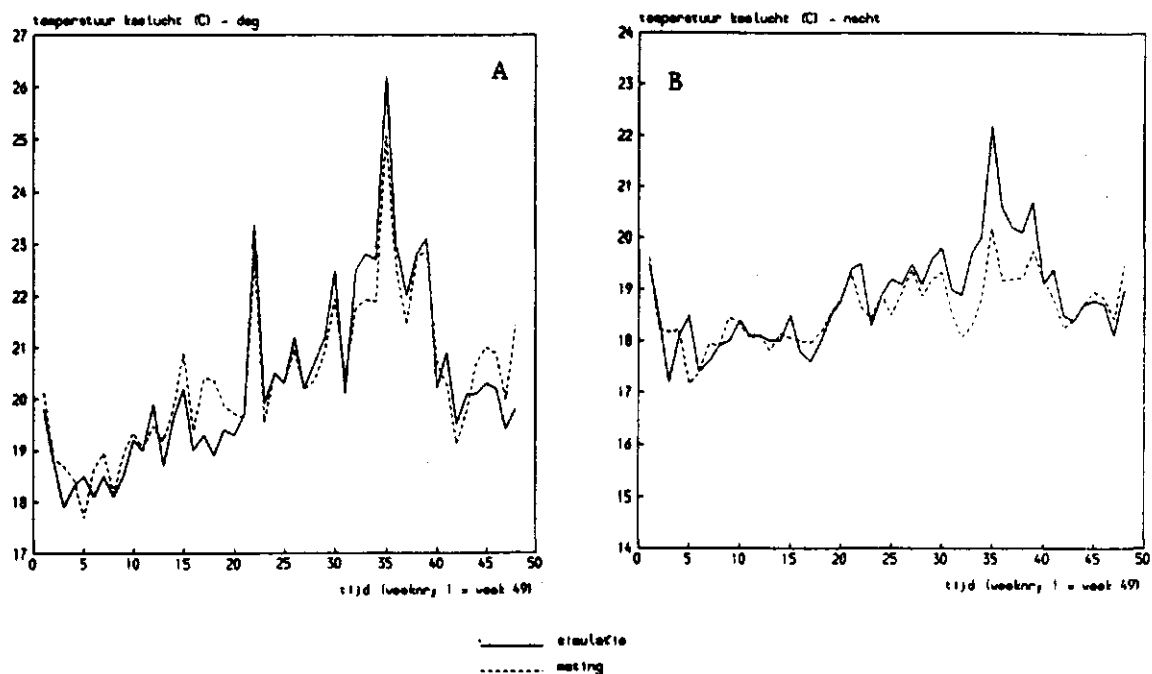
Voor een gedetailleerde beschrijving van de bedrijven wordt verwezen naar
deelverslag 4a.

3.3. Nabeschuiving van validatie

De resultaten van de validatie van het ECP-model zijn uitvoerig beschreven in deelverslag 4c. In deze paragraaf zal een nabeschuiving van de resultaten worden gegeven. Ter illustratie zijn enkele representatieve figuren van deelverslag 4c in deze paragraaf opgenomen.

- temperatuur van kaslucht

Voor een goede simulatie van de temperatuur van de kaslucht door het ECP-model is het van belang dat de instellingen voor stook- en ventilatietemperatuur, p-band en enkele randfactoren zoals minimum raamstand en minimum buistemperatuur goed worden ingevuld.

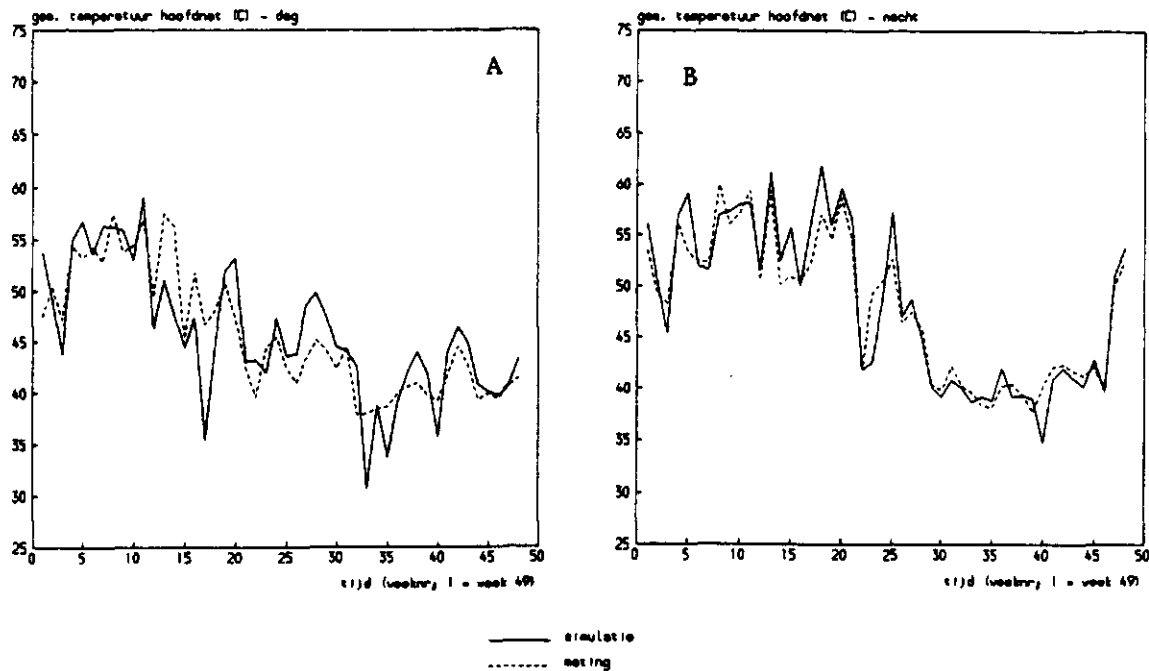


Figuur 2. Gesimuleerde en gemeten temperatuur van kaslucht van bedrijf 1 (teeltseizoen 1989 - 1990) (A = dag; B = nacht)

In het algemeen wijkt de gesimuleerde temperatuur van de kaslucht maximaal 1 °C af van de gemeten waarde. Een groot deel van de tijd is de afwijking zelfs geringer dan 0.5 °C. Dit geldt voor zowel de gemiddelde dag- als nachttemperatuur (figuur 2).

- temperatuur van verwarmingsnet

Het ECP-model simuleert de buistemperatuur van het hoofdnets in het algemeen binnen een nauwkeurigheid van 5 C. Dit geldt voor zowel de gemiddelde buistemperatuur als voor de aanvoertemperatuur, zowel overdag als 's nachts (figuur 3). Voor een goede simulatie van de buistemperatuur is het van belang dat het aantal buizen en de andere parameters van het verwarmingssysteem en de minimum buistemperatuur goed worden ingevuld.



Figuur 3. Gesimuleerde en gemeten gemiddelde temperatuur van hoofdnets van verwarming van bedrijf 1 (teeltseizoen 1989 - 1990)
(A = dag; B = nacht)

Afwijkingen groter dan 5 C kunnen optreden als de gesimuleerde warmtevraag onder- of overschat wordt. Bij gebruik van een scherm in de kas blijkt het model tot een geringere energiebesparing te komen dan in werkelijkheid (zie hierna bij aardgasverbruik). Daardoor wordt de buistemperatuur overschat. Verder wordt in het ECP-model geen rekening gehouden met een secundair buizenet dat in bepaalde perioden van het jaar actief wordt gebruikt. Daardoor zal de werkelijke buistemperatuur van het hoofdnets minder hoog hoeven zijn.

In de zomer lijkt de gesimuleerde buistemperatuur op enkele bedrijven onderschat te worden. Dit is het gevolg van een onjuiste meting van de buistemperatuur. Indien er geen warmtevraag is, wordt meestal de circulatiepomp van het verwarmingssysteem automatisch uitgeschakeld. Aangezien de buistemperatuur in een geïsoleerd buisgedeelte wordt gemeten, is die temperatuur hoger dan de werkelijke buistemperatuur van een ongeïsoleerde buis.

Op enkele bedrijven zonder warmtebuffer wordt een buisverhoging toegepast als de CO₂-concentratie te ver daalt. Daardoor kan meer warmte van de ketel worden afgevoerd, waardoor de ketel minder snel de maximum temperatuur bereikt. Het ECP-model heeft deze mogelijkheid niet.

- aardgasverbruik

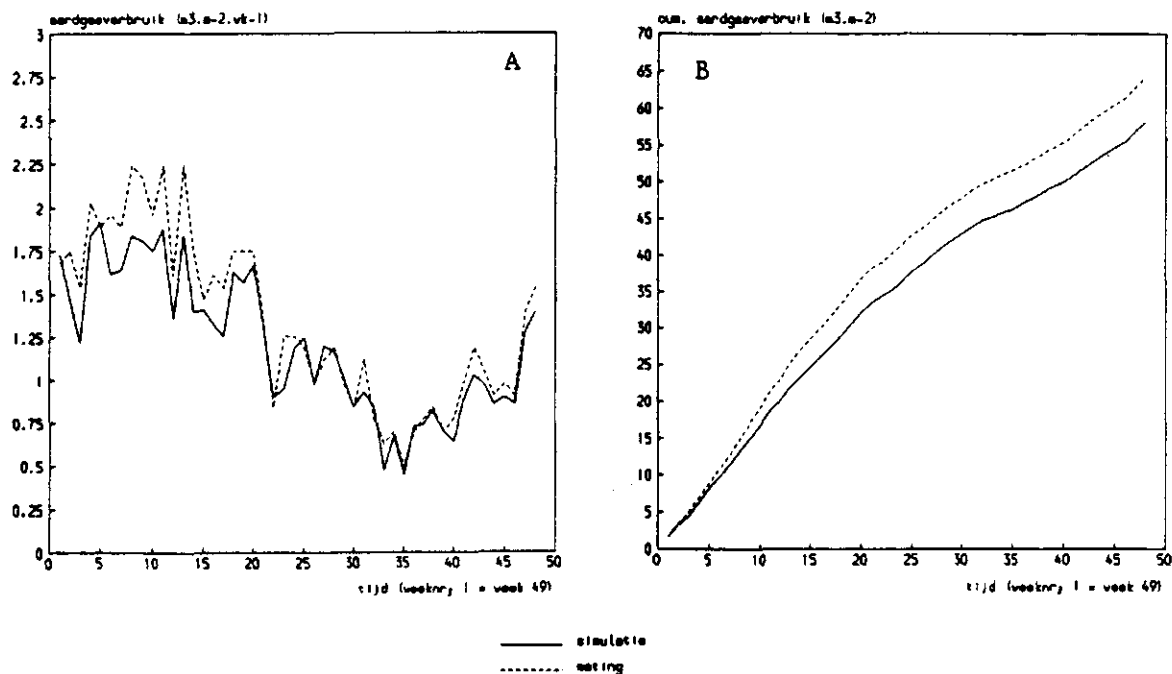
De dynamiek van het gesimuleerde aardgasverbruik komt goed overeen met het gemeten verbruik. Dit geldt op etmaalbasis (dag- of nacht), maar ook op weekbasis. Uit de simulatieresultaten volgde dat het zinvol was rekening te houden met warmteverliezen door gevels. Het geveloppervlak van de bedrijven varieerde van 10 tot 16 % van het kasdekoppervlak.

Voor 9 van de 11 bedrijven lag het gesimuleerde cumulatieve verbruik tussen -10.3 en +9.8 % van het gemeten verbruik. De twee andere bedrijven waren met -16.2 % en +20.0 % echte uitschieters. De afwijkingen zijn het gevolg van een combinatie van verschillende oorzaken.

De overschatting van het aardgasverbruik treedt alleen op bij bedrijven met een scherm. Vergelijking van een run met een scherm en een run zonder scherm voor hetzelfde bedrijf leverde een gesimuleerde energiebesparing op van 20 tot 25 %. Volgens literatuurgegevens (bijvoorbeeld Van Holsteijn, 1990) zou een besparing van 40 tot 45 % mogelijk moeten zijn. Een oorzaak van de tegenvallende energiebesparing kan veroorzaakt worden door een niet correcte simulatie van de vochthuishouding van een kas met scherm. De vorming van condens op het scherm is hierin een zwak punt. Het al dan niet optreden van condens op een foliescherm beïnvloedt de fysische eigenschappen van het scherm, want water is onderlatend voor warmtestraling. Daarnaast kan de overschatting van het energieverbruik bij een scherm worden veroorzaakt door een verkeerde inschatting van de luchtuitwisseling door het scherm.

Voor de onderschatting van het aardgasverbruik zijn twee redenen aan te wijzen. Ten eerste valt bij de validatieresultaten op dat bedrijven met een secundair buizenet de overschrijding groter is dan bij bedrijven zonder zo'n net. In bepaalde delen van het jaar wordt het secundaire buizenet actief gebruikt. Dit houdt in dat een gewenste buistemperatuur wordt nagestreefd. Bij de simulatieberekeningen wordt daar geen rekening meegehouden. Daardoor kan werkelijke aardgasverbruik hoger uitvallen. Daarnaast daalt het rendement van de condensor bij het actief gebruik van het secundaire buizenet, omdat door een warmere retourtemperatuur minder warmte van de condensor kan worden gebruikt.

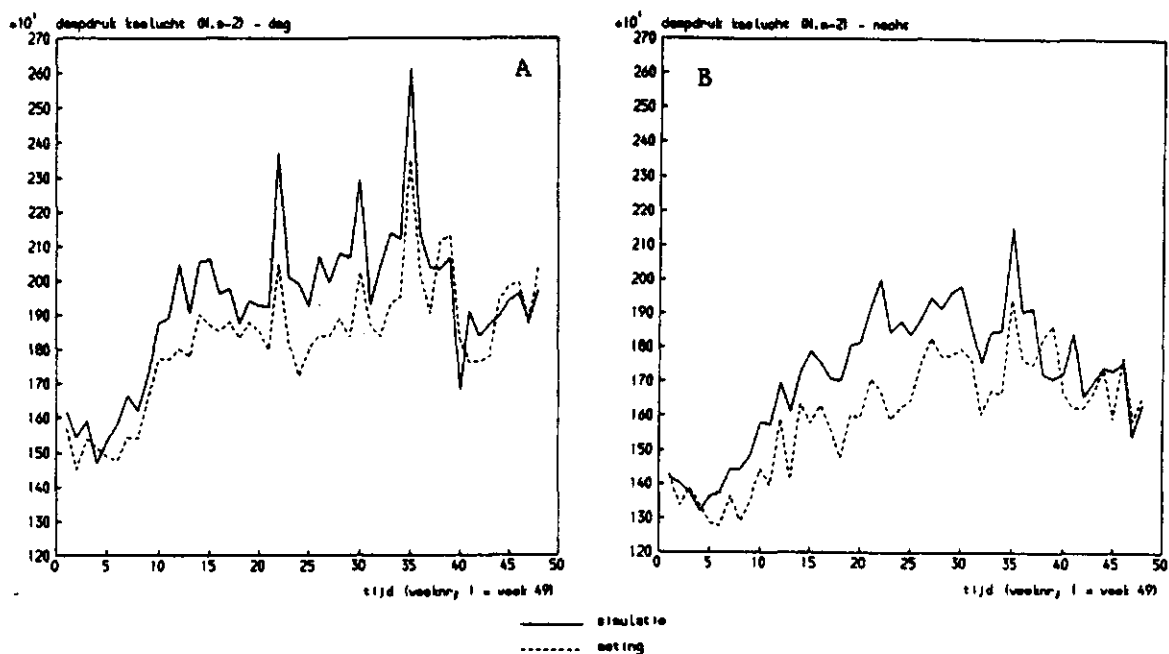
Ten tweede kan de onderschatting van het aardgasverbruik het gevolg zijn van de lokatie van het bedrijf. Uit het kustlocatieproject (Breuer, 1989), volgde de gunstige ligging van het PTG. Bedrijven dicht bij de kust zouden een 10 % hoger energieverbruik kunnen hebben. Voor bedrijven verder van de kust en het PTG stijgt het aardgasverbruik. Dit kan oplopen van ca. 15 % voor bedrijven op 20 km van de kust. Aangezien alle validatieruns met het buitenklimaat zoals gemeten op het PTG zijn uitgevoerd, kunnen daarmee verschillen in het energieverbruik optreden van maximaal 20 %. Figuur 4 geeft beeld van het aardgasverbruik van een bedrijf tussen kust en PTG, met secundair buizenet en zonder scherm.



Figuur 4. Gesimuleerde aardgasverbruik met gevelcorrectie en gemeten aardgasverbruik van bedrijf 1 (teeltseizoen 1989 - 1990) (A = per week; B = cumulatief)

- luchtvochtigheid

De simulatie van de vochthuishouding van de kaslucht is een geen sterk punt van het model. De dynamiek is wel juist, maar het niveau wordt in het algemeen overschat (figuur 5). Overdag is de overschatting door het ECP-model groter dan 's nachts.



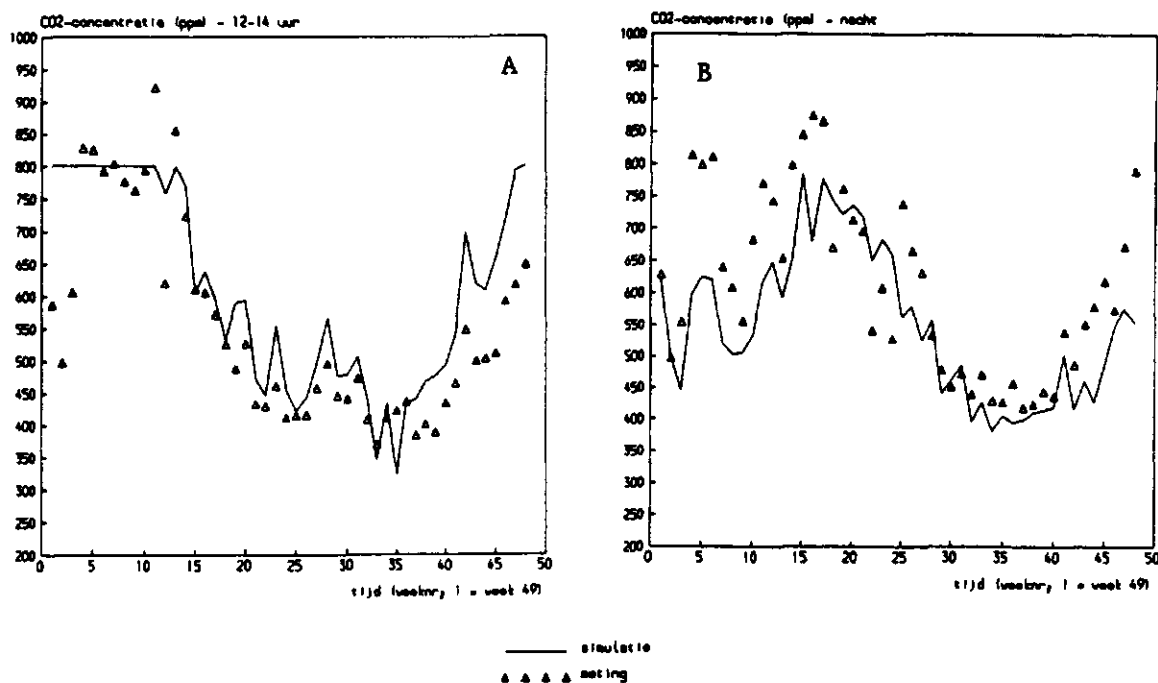
Figuur 5. Gesimuleerde en gemeten dampdruk van kaslucht van bedrijf 1 (teeltseizoen 1989 - 1990) (A = dag; B = nacht)

Waarschijnlijk is de overschatting het gevolg van een overschatting van de verdamping. In het ECP-model wordt uitgegaan dat alle bladlagen dezelfde bijdrage leveren aan de verdamping. Uit onderzoek van De Graaf (PTG, pers.med.) blijkt dit niet het geval te zijn. Indien van een paprikagewas de bovenste bladlaag (20 % van LAI van 6) werd verwijderd, daalde de verdamping met 60 %.

Uit hetzelfde onderzoek bleek dat de verdamping onder invloed van hogere CO₂-concentratie met ca. 10 % geremd werd, doordat de huidmondjesweerstand toenam (Nederhoff et al.). In het ECP-model wordt daar geen rekening mee gehouden. Daardoor kan de verdamping overschat worden, en daarmee ook de luchtvochtigheid. Overigens heeft de toename van de huidmondjesweerstand een zeer gering effect op de fotosynthese.

- CO₂-concentratie

De gesimuleerde CO₂-concentratie komt overdag en 's nachts in het algemeen goed overeen met de gemeten concentratie. Alleen 's morgens vroeg wordt de CO₂-concentratie soms overschat, doordat in werkelijkheid misschien afwijkende CO₂-streefwaarde zijn aangehouden of meer gelucht is. Overdag is de overschatting maximaal 50 ppm (figuur 6).

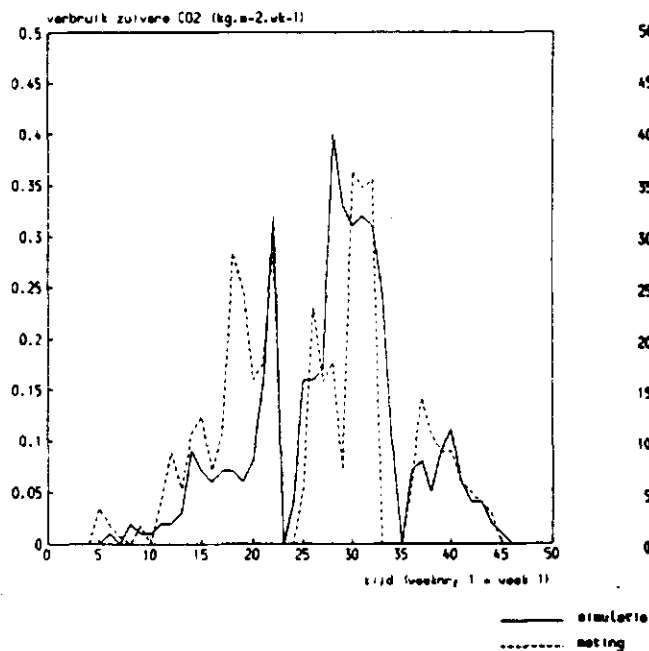


Figuur 6. Gesimuleerde en gemeten CO₂-concentratie in kaslucht van bedrijf 1 (teeltseizoen 1989 - 1990) (A = 12-14 uur; B = nacht)

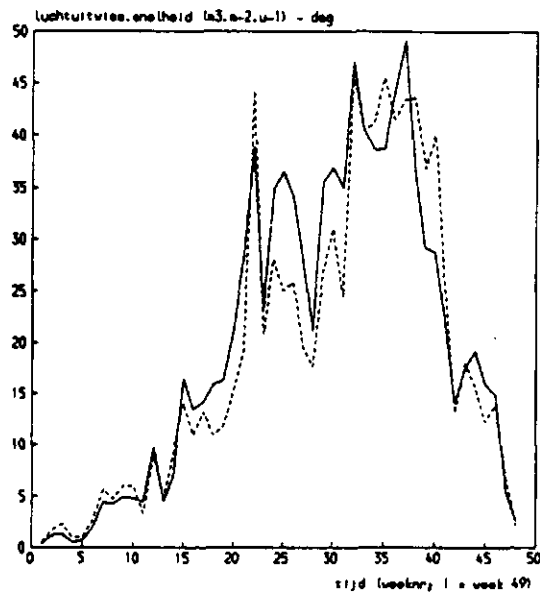
- CO₂-verbruik

Het verbruik aan zuivere CO₂ hangt sterk af van van de CO₂-streefwaarde. In werkelijkheid wordt deze waarde afhankelijk van gewasstadium, kg-prijs en buitencondities bijgesteld. Op het bedrijf waar naast rookgas CO₂ ook zuivere CO₂ is gedoseerd, kwam het gesimuleerde jaarverbruik aan zuivere CO₂ overeen met het werkelijke verbruik (figuur 7).

Aangezien zowel de CO₂-concentratie als de luchtuitwisseling (figuur 8) goed gesimuleerd wordt, mag worden aangenomen dat dit ook voor het gesimuleerde verbruik van rookgas CO₂ geldt.



Figuur 7.
Gesimuleerde en gemeten cumulatief
verbruik van zuivere CO₂ van bedrijf 8
(teeltseizoen 1989 - 1990)



Figuur 8.
Gesimuleerde en 'gemeten' lucht-
uitwisselingssnelheid van bedrijf 1
(dag, teeltseizoen 1989 - 1990)

- kg-produktie

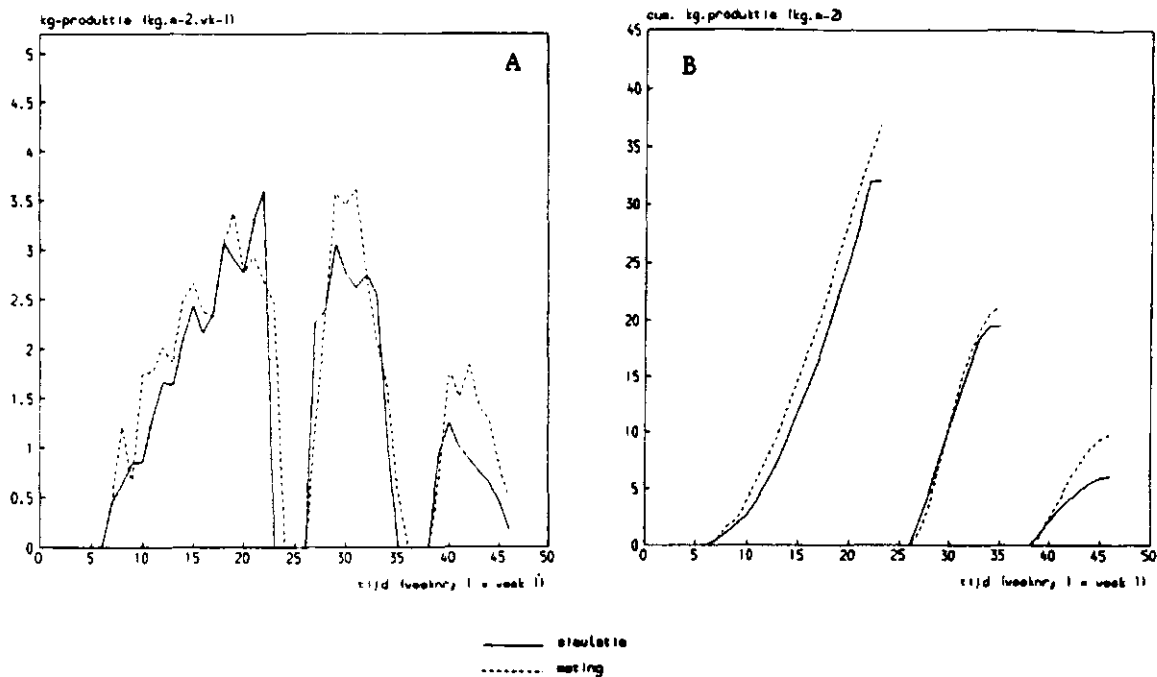
De kg-produktie wordt door het ECP-model berekend uit de gewasfotosynthese. Daarbij wordt rekening gehouden met de uitgroeiduur en het drogestofgehalte van de vruchten en de assimilatenverdeling tussen vruchten en de overige delen van de plant (zie deelverslag 1a). Verder moet het dagnummer van de start van de oogst worden ingevuld.

De gesimuleerde wekelijkse kg-produktie komt van komkommer, paprika (groen en rood) en tomaat (ronde en vleestomaat) in grote lijnen goed overeen met de werkelijkheid. Echter het ECP-model is niet in staat de fluctuaties in de weekproduktie goed te simuleren. Met name bij paprika zijn die fluctuaties in de gemeten produktie erg sterk. Daarom geven de cumulatieve verlopen van de produkties een beter beeld van de kwaliteit van het ECP-model.

Op jaarbasis is de produktie met het ECP-model met 10 % onnauwkeurigheid te voorspellen. Daarbij wordt in het ECP-model uitgegaan van een gewas dat onder optimale omstandigheden groeit. In de praktijk kan door ziekten en plagen de produktie terugvallen. Een spintaantasting bij komkommer kan bijvoorbeeld een oogstreductie van 10 % tot gevolg hebben (Vegter, 1990). Hieronder volgen enkele opmerkingen bij elk van de gewassen.

- komkommer

In het algemeen wordt de produktie van de voorjaarseelt goed gesimuleerd, maar aan het einde van de teelt wordt de produktie soms overschat. Dit verschil kan veroorzaakt zijn door een veroudering van het gewas en uitval waardoor de werkelijke produktie terugvalt. Indien een zomerteelt wordt aangehouden, dan levert de simulatie geen problemen op (figuur 9).

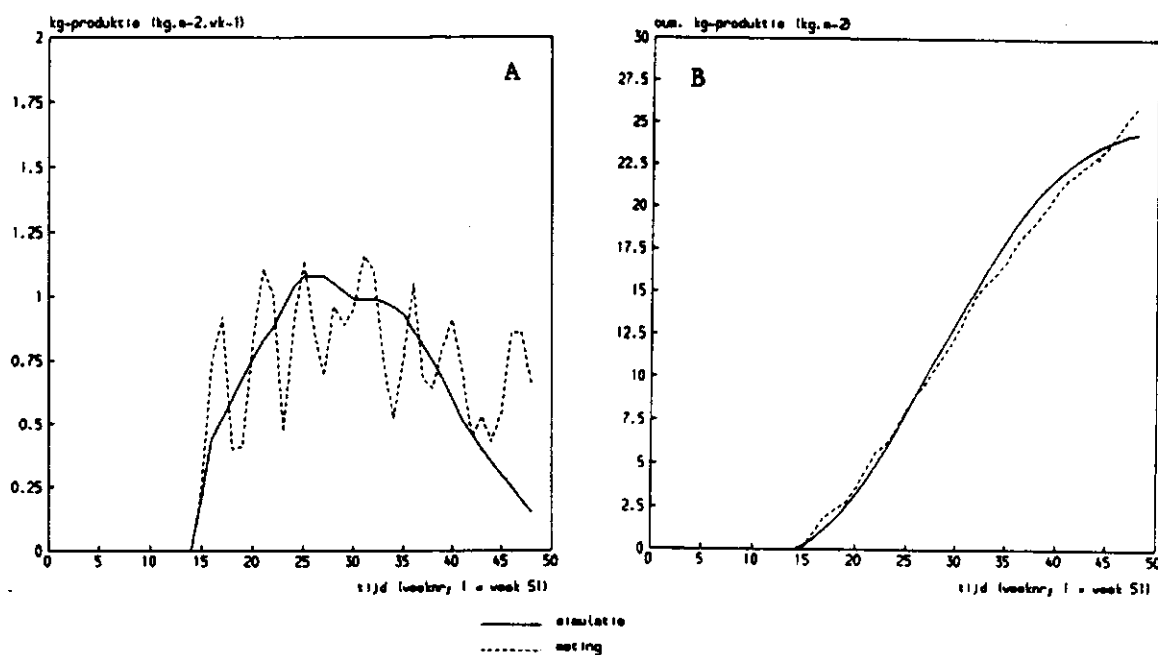


Figuur 9. Gesimuleerde en gemeten kg-produktie van komkommer van bedrijf 8 (teeltseizoen 1989 - 1990) (A = per week; B = cumulatief)

Tot slot wordt in het begin van de najaarseelt in werkelijkheid een hogere produktie gehaald dan gesimuleerd. Dit komt heel duidelijk in figuur 9 naar voren. Hierbij bestaat het vermoeden dat de constant veronderstelde verdeelsleutel van 70 % naar de vrucht in het najaar hoger bijgesteld moet worden.

- paprika

Een probleem bij de simulatie van de werkelijke produktie van paprika is de vorming van zetsel in de praktijk. Dit geeft pieken en dalen in de produktie (figuur 10). Bij de wekelijkse produktie valt op dat midden in de zomer gemiddeld een hogere produktie wordt gesimuleerd dan gemeten. Aan het einde van de teelt is het omgekeerde te zien. Dan wordt de produktie door het model onderschat. Deze onderschatting kan komen doordat het gewas gekopt is. Daardoor gaan er meer assimilaten naar de vruchten. Verder wordt door een behandeling met Ethrel de produktie naar voren gehaald die anders niet meer geoogst zou worden.

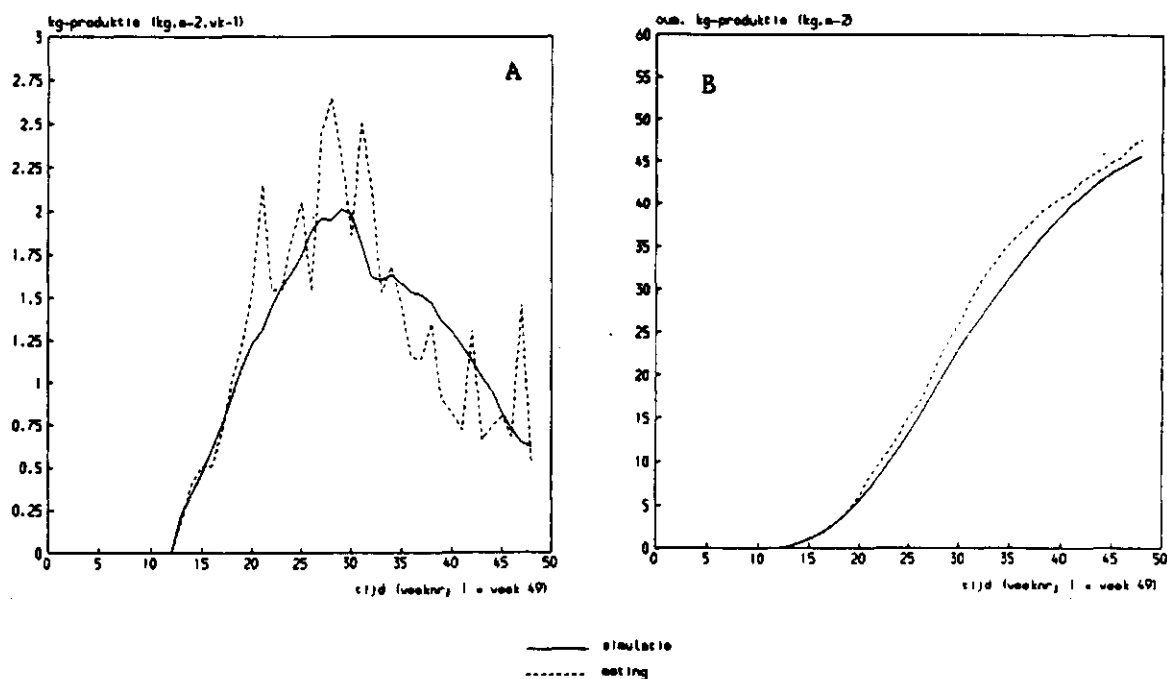


Figuur 10. Gesimuleerde en gemeten kg-produktie van rode paprika van bedrijf 6 (teeltseizoen 1989 - 1990) (A = per week; B = cumulatief)

Bij de cumulatieve produktie worden de pieken en dalen van de zetsels afgevlakt en blijkt de gesimuleerde produktie van zowel groene als rode paprika goed met de meting overeen te komen.

- tomaat

De vergelijking van simulatieresultaten van de drie hogedraad teelten met de meetgegevens laten een goede overeenkomst zien. De produktie wordt tot en met de zomer in geringe mate onderschat, maar in de nazomer en najaar wordt de produktie duidelijk overschat (figuur 11). Deze overschatting kan het gevolg zijn van een te hoog ingeschatte LAI. Ook kan de reflectie van het grondoppervlak te hoog zijn ingeschat, omdat door de stengelmassa op het folie en vervuiling de reflectiewaarde in de loop van de teelt kan teruglopen. Uiteindelijk is het maximale verschil van de cumulatieve produktie ten opzichte van de gerealiseerde produktie van deze drie bedrijven 5 %.



Figuur 11. Gesimuleerde en gemeten kg-produktie van tomaat van bedrijf 1 (teeltseizoen 1989 - 1990) (A = per week; B = cumulatief)

Bij een bedrijf met een 'op-en-neer'-teelt wordt net als bij de drie hogedraad bedrijven de vroege produktie onderschat. Midden in de zomer valt de gemeten produktie opeens terug, waardoor de gesimuleerde produktie de achterstand deels kan goed maken. Deze inzinking van de gemeten produktie is het gevolg van het naar beneden groeien van de kop. Aan het einde van de eerste teelt is de cumulatieve produktie met 7.5 % onderschat. Bij de tussenplanting met vleestomaat op dit bedrijf wordt de produktie in het begin onderschat. Het overschakelen van de ene op de andere teelt is bij de simulatieberekeningen niet eenvoudig, omdat slecht een deel van het totale bladoppervlak aan de gewasfotosynthese van het nieuwe gewas bijdraagt. Ook aan het einde van de teelt wordt de produktie onderschat, doordat in werkelijk een oogstpiek ontstaat. Daardoor komt de cumulatieve gesimuleerde produktie uiteindelijk 17 % lager uit dan de gemeten produktie.

De oogstpiek van de gemeten produktie aan het einde van de teelt is ook terug te vinden bij de hogedraad bedrijven. De oogstpiek kan het gevolg zijn van:

- toepassing van Ethrel, waardoor vruchten die normaal niet meer geoogst kunnen worden, versneld doorkleuren en oogstbaar zijn;
- verwijderen van kop uit plant. Hierdoor zijn meer assimilaten beschikbaar voor de vruchten.

Dit zijn aspecten waar bij de simulatie geen rekening mee is gehouden.

Bij de vier tomaten bedrijven is het niet mogelijk om de fluctuaties van de weekproduktie te simuleren. Daarvoor zou bijvoorbeeld de invloed van de temperatuur op de uitgroeiduur en doorkleuring van de vruchten moeten worden meegenomen.

4. EINDDISCUSSIE

4.1. Gebruiksmogelijkheden van ECP-model

De aanleiding voor het ontwikkelen van het ECP-model was het ontbreken van kengetallen van CO₂-verbruik, aardgasverbruik en kg-produktie bij verschillende CO₂- en warmteuitrustingen. Daardoor was het niet mogelijk om een goed onderbouwd investeringsadvies te geven voor bijvoorbeeld de installatie van een warmteopslagtank.

De validatieresultaten laten zien dat het ontwikkelde ECP-model voor dit doel geschikt is. Zowel het gecumuleerde aardgasverbruik als de cumulatieve kg-produktie kunnen binnen een foutmarge van 10 % worden gesimuleerd. Op weekbasis zijn de verschillen tussen simulatie en werkelijkheid groter. In het beslissingsmodel voor CO₂ (Van Uffelen et al., 1990abcde) waarin het simulatiegedeelte van het ECP-model een onderdeel vormt, wordt gewerkt met vierweekse perioden. Daardoor zullen de afwijkingen geringer zijn dan bij gebruik van resultaten op weekbasis.

Verder wordt in het beslissingsmodel voor CO₂ de simulatie uitgevoerd voor de uitgangssituatie (nulsituatie) en voor het investeringsalternatief. Vervolgens worden de simulatieresultaten gecorrigeerd voor het verschil tussen de simulatieresultaten voor de nulsituatie en de werkelijk gemeten produktie en aardgasverbruik (gegevens uit de bedrijfsregistratie). Daardoor worden verschillen tussen simulatie en werkelijkheid opgevangen, bijvoorbeeld a.g.v. geveleffecten, gebruik van secundair net, schermgebruik of lokatie.

De berekeningen kunnen worden uitgevoerd voor de belangrijkste vrucht-groenten, namelijk komkommer, paprika (groen of rood) en tomaat (ronde en vlees). Daarmee kunnen voor 70 % van het glasgroentenareaal vragen op het gebied van CO₂, warmtebuffering en restwarmte beter worden beantwoord.

Naast het gebruik van het ECP-model in het beslissingsmodel voor CO₂ heeft het ECP-model op zich zelf al zijn nut bewezen als onderzoekinstrument voor het doorrekenen van:

- CO₂-verbruik, gebruik van rookgas CO₂, fotosynthese en produktie bij verschillende CO₂-strategiën en bedrijfsuitrustingen (Houter, 1990 en 1991);
- effecten op temperatuur bij de reductie van ventilatiecapaciteit van kas bij gebruik van insectengaas in de luchtramen (Bakker en Houter, 1990);
- invloed van het aanhouden van minimum raamstand en/of minimum buistemperatuur op het aardgasverbruik.

Daarnaast zijn er andere toepassingen van het ECP-model denkbaar, bijvoorbeeld bij het doorrekenen van op te zetten proef om inzicht te krijgen in de te verwachten behandelingsverschillen en het doorrekenen van proefresultaten om de resultaten te kunnen veralgemeniseren voor een gemiddeld jaar.

Ook zou het ECP-model gebruikt kunnen worden bij het doorrekenen van de gebruiksmogelijkheden van een TE-installatie waarvan de gereinigde rookgas geschikt is voor CO₂-dosering. Bij combinatie van zo'n installatie met een warmtebuffer zou globaal tweemaal zoveel rookgas CO₂ gedoseerd kunnen worden per eenheid opgeslagen warmte in de buffer dan bij een warmtebuffer zonder TE-installatie. Immers bij een TE-installatie wordt ongeveer de helft van de verbrandingsenergie van aardgas in warmte omgezet en de rest in electriciteit.

Het ECP-model is speciaal ontworpen voor het doorrekenen van lange perioden. Voor bijvoorbeeld investeringsbeslissingen moet een geheel jaar worden doorgerekend. Daardoor worden minder grote eisen gesteld aan de gedetailleerdheid van bijvoorbeeld de ingevoerde klimaatregelinstellingen. Voor het doorrekenen van kortere perioden heeft het ECP-model zijn beperkingen. Voor de simulatie van het verloop binnen een dag is het model nog niet voldoende gevalideerd. Hiervoor is het zeker noodzakelijk dat de klimaatregelinstellingen nauwkeurig worden ingevuld. Simulaties met tijdstappen korter dan één uur kunnen niet worden uitgevoerd. Voor simulaties van het energieverbruik en kasklimaat op weekbasis moeten de klimaatregelinstellingen kritisch worden bekeken. De uitgebreide validatie heeft laten zien dat het model bij buitentemperaturen tussen -10 en 30 °C de werkelijkheid goed nabootst.

In het ECP-model is het gebruik van deksproeiers niet mogelijk. Het gebruik van een scherm heeft in het ECP-model zijn beperkingen. Enerzijds komt de energiebesparing van het scherm niet overeen met werkelijke waarden. Verder heeft het gebruik van een scherm overdag in de kas gevolgen voor de CO₂-balans. Hiermee wordt in het ECP-model geen rekening gehouden.

Voor de simulatie van de kg-productie op weekbasis komt het ECP-model nog te kort, omdat in werkelijkheid de productie fluctueert. Bij tomaat is er een temperatuureffect op de doorkleuring, paprika heeft last van zettingsgolven en bij komkommer worden eerst de stamvruchten en later de rankvruchten geoogst. In het ECP-model wordt de invloed van temperatuur op de productie niet meegenomen.

In principe is het mogelijk om met het ECP-model een teelt met een tussenplanting door te rekenen, bijvoorbeeld voor tomaat. Maar dan moeten drie runs worden uitgevoerd, één voor de voortteelt, één voor de tussenteelt en één voor beide teelten voor het fysisch gedeelte. Voor paprika kan een run voor of groen, of rood worden uitgevoerd. Een combinatie is niet mogelijk.

4.2. Verbetering en aanvulling van ECP-model

4.2.1. Algemeen

Een model is een afspiegeling van de werkelijkheid, maar een model zal de werkelijkheid nooit volledig kunnen weergeven. Dit geldt ook voor het ECP-model. Toch zijn er enkele punten waarop het model verbeterd kan worden (verbetering), of waarmee het model uitgebreid kan worden (verbreding) of waarop het model gedetailleerd kan worden (verdieping).

4.2.2. Verbetering

Op twee aspecten kunnen de simulatieresultaten worden verbeterd, ten eerste gewasparameters en ten tweede meer fysische parameters.

De simulatieresultaten van het ECP-model kunnen betrouwbaarder worden als de waarden van verschillende gewasparameters en fysische parameters beter bekend zijn.

- gewasparameters

De gewasgroei en de gewasontwikkeling wordt door het ECP-model niet gesimuleerd, maar wordt van datafiles ingelezen. Een aantal van deze parameters is niet nauwkeurig bekend:

- LAI (bladoppervlak per eenheid grondoppervlak)

Bij tomaat loopt de LAI in de tweede helft van de teelt sterk terug (De Koning, 1991). De praktijk probeert dit op te vangen door het aanhouden van een extra stengel of een hogere plantdichtheid. Voor het ECP-model is het van belang hoe de LAI-verloop in een teelt is. Non-destructieve en destructieve metingen in de praktijk bij verschillende plantdichtheden en stengeldichtheden gedurende het teeltseizoen kunnen daar antwoord op geven. Bij komkommer treedt in de loop van een teelt veroudering en verdroging van bladeren op. Het is niet bekend in welke mate dit optreedt en in welke mate de minder funktionele bladeren licht opvangen ten koste van funktionele, jonge bladeren.

- drogestofgehalte van vruchten

Bij de validatie is voor elk bedrijf het gemeten drogestofgehalte ingevuld. De gemeten drogestofgehalten vertoonden een spreiding in het seizoen en tussen de bedrijven (zie deelverslag 4b, hoofdstuk 2). Het verschil tussen de hoogste en de laagste monsters was soms meer dan 20 % (relatief). Omdat het drogestofgehalte lineair uitwerkt op de versproduktie is het van groot belang dat het drogestofgehalte goed wordt ingevuld. Meer inzicht in de oorzaken van de grote variatie in het gehalte is daarom ook gewenst.

- drogestofverdeling

Bij komkommer bestaat het vermoeden dat de drogestofverdeling tussen vruchten en het overige deel van de plant van de najaarsteelt anders is dan van de teelten in winter/voorjaar en zomer.

Aan het einde van de teelt van tomaat en paprika wordt de kop uit het gewas gehaald. Daardoor wijzigt ook de drogestofverdeling.

Een afwijking in de drogestofverdeling werkt lineair door op de versproduktie. Een teelt met enkele plantslachten kan hier antwoord op geven.

Daarnaast zijn enkele parameters die de drogestofaanmaak bepalen niet nauwkeurig bekend:

- onderhoudsademhaling

In het ECP-model is de onderhoudsademhaling LAI-afhankelijk. Uit de gevoeligheidsanalyse bij een LAI van 2 bleek dat een 10 % hogere onderhoudsademhaling in de winter een 10 tot 20 % lagere drogestofproductie veroorzaakte. In de zomer was dit slechts 1.6 %. Op jaarbasis was de reductie 2.5 % (zie deelverslag 5). Gezien de grote invloed van de onderhoudsademhaling op de drogestofaanmaak in de winter is het van belang dat hiervoor een reële waarde wordt ingevuld.

- assimilatenbehoefte - ASRQ (assimilate requirement)

De ASRQ is de CH₂O-behoefte per gram drogestof. Omdat deze lineair uitwerkt op de drogestofproductie en vervolgens op de versproductie is het van groot belang dat deze parameter goed wordt ingeschat.

Uit meetresultaten van Gijzen (CABO - Wageningen) blijkt een verschil tussen gewassen. Hij doet de suggestie de ASRQ gewasafhankelijk en gewasstatusafhankelijk in te vullen. Hiervoor zijn uitgebreide gewasanalyses noodzakelijk, omdat op dit moment nog 10 - 20 % onzekerheid bestaat over de grootte van de berekende ASRQ.

- fysische parameters

- transmissie van kasdek

Bij de validatie is uitgegaan van een berekende waarde. Deze waarde is gebaseerd op een schoon kasdek. In werkelijkheid is het kasdek alleen aan het begin van een teelt schoon en neemt de vervuiling in de loop van het seizoen toe. De mate waarin de vervuiling optreedt, is niet bekend.

- reflectie van grondoppervlak

De reflectie van het grondoppervlak (wit folie) is alleen bij een gewas met een lage LAI van belang. Dit is het geval aan het begin van een teelt en bij tomaat ook in de tweede helft van de teelt als de LAI terugloopt. Op dit moment is niet bekend hoe de reflectie in de loop van een teelt is teruggelopen. Bij tomaat komen de stengels bij een hogedraad-teelt op de grond te liggen. Dit zal de reflectie verlagen.

- rendement verwarmingsinstallatie

Uit de rendementsmetingen van de Gasunie uitgevoerd op de intensieve meetbedrijven (Kiel en Bleeker, 1990 en deelverslag 4b) bleek het rendement van de ketel bij hoge belasting in geringe mate terug te lopen. Hetzelfde was te zien bij ketel met condensor.

In 1989/1990 is door het IMAG en het LEI de gebruiksrendementen van verschillende installaties in de praktijk gemeten. Bij het schrijven van dit verslag waren de eindresultaten van dat onderzoek nog niet beschikbaar. Een afwijking in het rendement werkt lineair door op het gesimuleerde aardgasverbruik.

4.2.3. Verbreding

De gebruiksmogelijkheden van het ECP-model kunnen worden uitgebreid door verbreding in de richting van andere groentegewassen of in de richting van bloemisterijgewassen.

- nieuwe groentegewassen

Het gewasgedeelte van het ECP-model is gebaseerd op een opgroeiend vruchtgroentegewas dat continu oogstbare vruchten produceert. Een gewas dat in het model opgenomen zou kunnen worden is aubergine.

Daarvoor moeten dan de volgende gegevens bekend zijn:

- LAI tijdens teeltseizoen;
- uitgroeiduur van vruchten en verdeling van assimilaten binnen vruchtgroeiperiode of gemiddelde periode waarop assimilaten geoogst worden;
- drogestofgehalte van vruchten;
- verdeling van drogestof tussen vruchten en overige deel van de plant;
- onderhouds- en groeiademhaling en ASRQ.

De meeste van deze gegevens kunnen in een teeltseizoen met plantslachtingen en chemische analyses worden bepaald.

Voor eenmalig oogstbare groentegewassen, zoals sla en radijs, zal een ander gewasmodel moeten worden gebouwd. Daarvan zal bijvoorbeeld de licht-absorptie, drogestofconversie en uitgroeiduur in kaart gebracht moeten worden.

- bloemisterijgewassen

De teelt van bloemisterijgewassen wordt gekenmerkt door het brede assortiment van gewassen en teeltwijzen:

- korte teelten met verscheidene stadia tot meerjarige teelten;
- blad- en bloeiende potplanten en snijbloemen;
- teelt in vollegrond, in steenwol of ander substraat, in potten met eb en vloed op betonvloer of op tabletten.

Een probleem bij de bloemisterijgewassen is de sierwaarde. De vraag is op welke wijze de verhoging van de fotosynthese a.g.v. CO₂-dosering tot uiting komt in een snellere teelt en/of betere kwaliteit.

Bij de verbreding van de inzetbaarheid van het ECP-model als onderzoek-instrument in de richting van de bloemisterijgewassen moet eerst een gewasmodel worden ontwikkeld, omdat de modelvorming van sierteeltgewassen nog in de kinderschoenen staat. De ontwikkeling van zo'n gewasmodel kan geheel onafhankelijk van het ECP-model.

Het is praktisch onmogelijk om voor elk gewas een gewasmodel te maken met dezelfde gedetailleerdheid als nu voor de vruchtgroentegewassen is gedaan. Dit zou voor enkele gewassen kunnen worden gedaan, bijvoorbeeld voor chrysant, roos en een bladplant. Het voordeel van chrysant is de relatief eenvoudige en zeer uniforme groeiwijze. Aan de rozenteelt is al veel onderzoek verricht en tevens is recent een modelstudie van roos verschenen (Lieth and Pasian, 1991). Het ontwikkelen van een model voor een bladplant sluit aan bij de modelontwikkeling van een potplant op het PBN in Aalsmeer.

Voor bloemisterijgewassen kan het nodig zijn het fysisch gedeelte van het ECP-model aan te passen, omdat:

- bij teelt op tabletten de verwarming in het tablet is geïntegreerd. Het is de vraag of het gedrag van zo'n systeem hetzelfde is als van 4 buizen van 51 mm per kap.
- bij bloemisterijgewassen overdag in het algemeen meer geschermd wordt dan bij de vruchtgroenten. Omdat de CO₂-balans overdag bij gebruik van een scherm nog niet in het ECP-model is opgenomen, moet dit als nog worden gedaan.

Voor het doorrekenen van investeringsbeslissingen kan waarschijnlijk worden volstaan met een vrij grove benadering waarbij naar cumulatieve gewasgroei wordt gekeken voor verschillende doorgerekende investeringsalternatieven. Dit is in het beslissingsmodel voor CO₂ vrij eenvoudig te realiseren. De enige vraag die dan opgelost moet worden is hoe de cumulatieve gewasgroei financieel gekwantificeerd moet worden.

4.2.4. Verdieping

De gebruiksmogelijkheden van het ECP-model kunnen worden uitgebreid door verdieping op de volgende punten:

1. scherm

Het ECP-model komt bij de simulatie van de energiebesparing van een foliescherm tot een geringere besparing dan in werkelijkheid (zie deelverslag 4c). Uit enkele testruns bleek dat de vorming van condens op het scherm sterk de energiebesparing kan beïnvloeden. Dit was ook te verwachten, omdat bij condensfilm op het folie het folie niet meer doorlatend is voor warmtestraling. Bij validatie was tevens onzekerheid over de luchtdoorlatendheid van een scherm.

Daarom is het gewenst onderzoek op te zetten waarin bestaande scherm-submodellen worden getest en eventueel worden aangepast. Vervolgens kan worden gekeken of het berekeningsalgoritme van het schermgedeelte van het ECP-model moet worden aangepast. Het kan ook zijn dat de simulatie van de vochthuishouding aangepast moet worden (zie punt 2), omdat de condensvorming daar een onderdeel van vormt.

Deelaspecten als kieren van scherm en perforatie in scherm zouden in dit onderzoek ook meegenomen moeten worden.

In het binnenkort op te starten Landbouwschap/NOVEM-project naar de fysische eigenschappen van scherm kunnen gegevens naar voren komen die van nut kunnen zijn voor het ECP-model. Wellicht kan het werk van Balemans (1989) ook nuttige informatie aanleveren.

2. vochthuishouding

De simulatie van de vochthuishouding van de kas is geen sterk punt van het ECP-model. Omdat de gewasverdamming een belangrijk onderdeel daarvan is, is het nuttig het transpiratiemodel goed te valideren. Eventueel moet het effect van CO₂-concentratie op de transpiratie via de huidmondjesreactie worden meegenomen. Ook de condensatie op scherm en kasdek vormen een onderdeel van de vochthuishouding van de kas.

Overigens is het in het ECP-model niet mogelijk op vocht te regelen.

3. verwarmingssysteem

In het ECP-model wordt momenteel alleen gewerkt met een hoofdnet onder het gewas. In de praktijk worden ook andere systemen gebruikt, bijvoorbeeld een 51 mm buis boven het gewas of een aanvullende gewasverwarming (groeibuis) als hijsverwarming.

Voor een goede benadering van de praktijksituatie is het gewenst dat in het ECP-model uit verschillende verwarmingssystemen kan worden gekozen. Ook kan een onderscheid tussen hoofd en secundair net worden gemaakt, waarbij de temperatuur van het secundaire net op een vaste waarde wordt gehouden (via klimaatregelinstellingen) en de temperatuur van het hoofdnet geregeld wordt voor het aanhouden van temperatuurregime.

Bij uitbreiding van het verwarmingssysteem in het ECP-model is het noodzakelijk dat het fysisch gedeelte zo wordt aangepast, dat er warmtestraling-uitwisseling plaats kan vinden tussen objecten onder en boven het gewas.

4. ventilatie

Momenteel wordt in het ECP-model nog steeds gewerkt met de ventilatie-formules van Bot (1983). De uiteindelijk berekende ventilatiefluxen komen wel goed overeen met die van De Jong (1990), maar zijn aan een vast lucht-raamtype gebonden. De formules van De Jong (1990) zijn wel voor verschillende raamttypen beschikbaar, maar dan moet wel enkele extra gegevens worden ingevoerd.

5. klimaatregeling

In het ECP-model kan het etmaal in twee perioden worden opgesplitst (dag en nacht). Voor het simuleren van praktijksituaties verdient het aanbeveling het aantal perioden naar 4 uit te breiden. Daarmee kan bijvoorbeeld ook een koude voornacht worden gesimuleerd.

Voor de stooktemperatuur, minimum buistemperatuur en ventilatietemperatuur (samen met minimum raamstand) zouden verschillende begintijdstippen van de perioden moeten kunnen worden opgegeven. Verder is het eenvoudiger om met een stijg- en daalsnelheid te werken dan met de duur van een overgangsperiode tussen 2 perioden. Tot slot kan bij de stralingsverandering op de temperatuur beter met een temperatuurwijziging worden gewerkt dan met een aparte absolute temperatuurinstelling.

6. temperatuurintegratie

Voor onderzoekdoeleinden kan het klimaatregelgedeelte van het ECP-model worden uitgebreid met een module voor temperatuurintegratie (De Koning, 1988ab, 1990). Daarmee kan met het ECP-model het aardgasverbruik bij verschillende temperatuurregimes met elkaar worden vergeleken.

7. CO₂-optimalisatie

De module voor CO₂-optimalisatie is niet up to date. Voor onderzoekdoeleinden moet de module worden uitgerust met dezelfde fotosynthese-subroutine als gebruikt in het ECP-model. Verder moeten gewasparameters worden aangepast voor paprika en tomaat.

8. temperatuurinvloed op vruchtgroei van tomaat

De invloed van temperatuur op de vruchtgroei (zetting en uitgroeiduur) is nog niet in het ECP-model opgenomen. Voor tomaat en komkommer worden hiervoor modellen ontwikkeld (onderzoek van resp. De Koning, PTG en Marcelis, CABO). Indien deze modellen gereed zijn, kunnen ze in het ECP-model worden opgenomen. Dan zou de relatie tussen enerzijds temperatuur-regime en anderzijds kg-produktie en aardgasverbruik kunnen worden bekeken.

Bovengenoemde acht punten geven aan waarmee de gebruiksmogelijkheden van het ECP-model als onderzoekinstrument kunnen worden uitgebreid. Van deze acht hebben punt 1 en 2 de hoogste prioriteit, omdat daarmee ook de kwaliteit van het ECP-model verbeterd kan worden. Maar deze twee punten zijn het moeilijkst te realiseren. Punt 4 tot en met 7 zijn daarentegen het eenvoudigst in het model op te nemen of te verbeteren.

5. EINDCONCLUSIE

Het ontwikkelde ECP-model, simulatiemodel voor energieverbruik, CO₂-verbruik en kg-produktie, geeft een goed beeld van de werkelijkheid bij buitentemperaturen tussen -10 en 30 C. Uit een uitgebreide validatie blijkt dat bij de simulatie van het aardgasverbruik en de kg-produktie van komkommer, paprika en tomaat met een foutmarge van 10 % moet worden gerekend. Het aardgasverbruik van een kas met scherm wordt duidelijk overschat. Het verdient daarom de aanbeveling het modelgedeelte van het scherm te verbeteren. Daarnaast heeft de vochthuishouding van de kas aandacht nodig.

Met het ECP-model is een hulpmiddel ontwikkeld waarmee betrouwbare kengetallen voor het beslissingsmodel voor het doorrekenen van de financiële consequenties van diverse investeringsbeslissingen rondom verwarming en CO₂ kunnen worden verkregen.

Tevens kan het ECP-model als onderzoekinstrument worden gebruikt voor het verkrijgen van inzicht in bijvoorbeeld warmtebuffering, CO₂-dosering, aardgasverbruik en fysisch processen.

Het ECP-model toont de praktische waarde van integratie van deelmodellen die het resultaat zijn van fundamenteel onderzoek aan. De inzetbaarheid van het ECP-model kan zowel in de diepte als de breedte worden vergroot, als andere submodellen in het ECP-model worden opgenomen.

De verzamelde gegevens van de intensieve meetbedrijven vormen een unieke dataset met gedetailleerde en betrouwbare gegevens, die voor velerlei toepassingen kunnen worden gebruikt. Als voorbeeld kan worden genoemd:

- modelontwikkeling;
- validatie van dynamische (deel-)modellen tot op tijdstappen van 5 minuten;
- geregistreerde klimaatregeling als referentie van een praktijkregeling bij het testen van nieuwe regelingen;
- analyse van meetresultaten voor verkrijgen van inzicht in deelprocessen.

6. BRONVERMELDING

- Anonymus, 1988. CO₂ in de kas. Proefstation voor Tuinbouw onder Glas en Consulentschappen voor de tuinbouw, Informatiereeks no. 85, 56 pp.
- Bakker, J.C. en B. Houter, 1990. Te grote ventilatiereductie kan problemen geven. Groenten en Fruit 46 (24): 43.
- Balemans, L., 1989. Assessment of criteria for energetic effectiveness of greenhouse screens: beoordeling van criteria voor energetische doeltreffendheid van schermen in kassen. Dissertatie, Rijks-universiteit, Gent, 157 pp.
- Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Proefschrift, Landbouwhogeschool, Wageningen, 239 pp.
- Breuer, J.J.G., 1989. Energiebehoefte voor kasteelten afhankelijk van de afstand tot de kustlijn. Rapport 113, IMAG, Wageningen, 124 pp.
- Goudriaan, J., 1986. Collegedictaat Simulatie van gewasgroei. Vakgroep Theoretische Teeltkunde, Landbouwhogeschool, Wageningen, 62 pp.
- Holsteijn, G.P.A. van, 1990. Op welk scherm valt de keus? Weekblad Groenten en Fruit 46 (13): 54-57.
- Houter, G., 1989a. Simulatie van het CO₂-verbruik in de glastuinbouw. Aanleiding, aanpak, resultaten en evaluatie (verslag 1). Intern verslag nr. 35, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 46 pp.
- Houter, G., 1989b. Simulatie van het CO₂-verbruik in de glastuinbouw. Gebruikershandleiding (verslag 2). Intern verslag nr. 36, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 71 pp.
- Houter, G., 1989c. Simulatie van het CO₂-verbruik in de glastuinbouw. Opbouw van simulatiegedeelte (verslag 3). Intern verslag nr. 37, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 53 pp.
- Houter, G., 1989d. Simulatie van het CO₂-verbruik in de glastuinbouw. Modelbeschrijving (verslag 4). Intern verslag nr. 38, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 60 pp.
- Houter, G., 1989e. Simulatie van het CO₂-verbruik in de glastuinbouw. Documentatie interactief gedeelte (verslag 5). Intern verslag nr. 39, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 59 pp.
- Houter, G., 1989f. Simulatie van het CO₂-verbruik in de glastuinbouw. Listings (verslag 6). Intern verslag nr. 40, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 410 pp.
- Houter, G., 1990. Simulation of CO₂ consumption, heat demand and crop production of greenhouse tomato at different CO₂ strategies. Acta Horticulturae 268: 157-164.
- Houter, G., 1991. Optimale CO₂-benutting met warmtebuffer. Groenten + Fruit/ Glasgroenten 1 (12): 32-33.

- Jong, T. de, 1985. Metingen aan en simulatie van het kasklimaat. Deel 1 en 2. Doctoraalverslag Natuur- en Weerkunde, Landbouwhogeschool, Wageningen, 53 pp.
- Jong, T. de, 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Dissertatie, Landbouwuniversiteit, Wageningen, 116 pp.
- Kiel, A. en J.B. Bleeker, 1990. De emissies en rendementen van drie verwarmingsketels bij glastuinbouwbedrijven. Rapport TP/M 90.R.1005, N.V. Nederlandse Gasunie, Groningen, 21 pp.
- Koning, A.N.M. de, 1988a. The effect of different day/nicht temperature regimes on growth, development and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science* 63 (3): 464-471.
- Koning, A.N.M. de, 1988b. An algorithm for controlling the average 24-hour temperature in glasshouses. *Journal of Horticultural Science* 63 (3): 473-477.
- Koning, A.N.M. de, 1990. Long-term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Scientia Horticulturae* 45 (1-2): 117-127.
- Koning, A.N.M. de, 1991. Te weinig blad geeft slechte lichtbenutting. *Groenten + Fruit / Glasgroenten* 1 (10): 30-31.
- Lieth, J.H. and C.C. Pasian, 1991. A simulation model for the growth and development of flowering rose shoots. *Scientia Horticulturae* 46 (1-2): 109-128.
- Nederhoff, E.M., J.G. Gijzen and J. Vegter, 1988. Measurement and simulation of crop photosynthesis of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in greenhouses. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 36: 253-264.
- Nederhoff, E.M., H. Gijzen and J. Vegter, 1989. Dynamic model for greenhouse crop photosynthesis: validation by measurements and applications for CO₂ optimization. *Acta Horticulturae* 260: 137-147.
- Nederhoff, E.M., A.A. Rijsdijk and R. de Graaf. Leaf conductance and rate of glasshouse grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by carbon dioxide (in prep.).
- Spitters, C.T.J., H. van Keulen and D.W.G. van Kraalingen, 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: R. Rabbinge, S.A. Ward en H.H. van Laar (eds.). *Simulation and systems management in crop protection*. PUDOC, Wageningen.
- Uffelen, R. van, Houter, B. en Vermeulen, P., 1990a. Beslissingsmodel voor CO₂ in de glastuinbouw: Investeringsselectie en Doseertaktiek. Gebruikershandleiding van het CO₂-beslissingsmodel. PTG verslag 5, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 93 pp.
- Uffelen, R. van, Houter, B. en Vermeulen, P., 1990b. Beslissingsmodel voor CO₂ in de glastuinbouw: Investeringsselectie en Doseertaktiek. Theoretische handleiding van het CO₂-beslissingsmodel. PTG verslag 6, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 52 pp.

- Uffelen, R. van, Houter, B. en Vermeulen, P., 1990c. Beslissingsmodel voor CO₂ in de glastuinbouw: Investeringsselectie en Doseertaktiek. Technische handleiding van het CO₂-beslissingsmodel. PTG verslag 7, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 101 pp.
- Uffelen, R. van, Houter, B. en Vermeulen, P., 1990d. Beslissingsmodel voor CO₂ in de glastuinbouw: Investeringsselectie en Doseertaktiek. Datafiles van het CO₂-beslissingsmodel. PTG verslag 8, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 82 pp.
- Uffelen, R. van, Houter, B. en Vermeulen, P., 1990e Beslissingsmodel voor CO₂ in de glastuinbouw: Investeringsselectie en Doseertaktiek. Programmafiles van het CO₂-beslissingsmodel. PTG verslag 9, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk.
- Vegter, J., 1990. Hoge dagtemperatuur bij start financieel interessant. Weekblad Groenten en Fruit, 46 (25): 76-77.
- Vermeulen, P.C.M., 1988. Kosten en baten berekening van CO₂-dosering en handhaven minimum CO₂-gehalte. Intern verslag 20, Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, 36 pp.